



Predicting mechanical properties and carbonation depth of expansive concrete based on hydration reaction model

その他（別言語等）のタイトル	水和反応モデルに基づく膨張コンクリートの力学的性質及び中性化深さの予測に関する研究
著者	NGUYEN Duc Van
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第471号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2021-03-23
URL	http://doi.org/10.15118/00010396

氏 名 NGUYEN DUC VAN(グエン ダック ヴァン)

学位論文題目 Predicting mechanical properties and carbonation depth of expansive concrete based on hydration reaction model
(水和反応モデルに基づく膨張コンクリートの力学的性質及び中性化深さの予測に関する研究)

論文審査委員 主査 教授 濱 幸雄
教授 溝口 光男
准教授 菅田 紀之
准教授 高瀬 裕也
副教授 崔 亨吉(慶北大学校・副教授)

論文内容の要旨

コンクリート用膨張材 (EX) は、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れを低減するために広く用いられているが、膨張材とセメントの水和反応に基づいて膨張コンクリートの力学的性質及び耐久性の予測に関する研究は少ないのが現状である。

そこで本研究では、膨張材を混和したコンクリートの初期材齢からの水和反応をモデル化するとともに、その水和反応モデルに基づいて膨張コンクリートの圧縮強度、中性化深さ及び膨張ひずみを予測する手法を確立することを目的としている。さらに、膨張コンクリートにおける圧縮強度、耐凍害性及び中性化抵抗性に及ぼす拘束条件の影響を実験的に把握している。本研究で提案した膨張材の水和反応モデルは、セメントの鉱物組成 (C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF) をパラメータとして用い、膨張材とセメントの水和率、水和発熱量、ゲルスペース比、ケイ酸カルシウム水和物 (CSH)、水酸化ナトリウム (CH)、エトリンガイトの生成量及び空隙率を予測することが可能である。水和反応モデルから算出されたゲルスペース比から膨張コンクリートの圧縮強度を予測する関係式を示した。また、水和反応モデルから CH 及び CSH の生成量を算出し、大気中の CO_2 のコンクリートへの拡散と CH 及び CSH と CO_2 との反応を考慮して膨張コンクリートの中性化深さを予測するための数学モデルを提案した。さらに、水和反応モデルからエトリンガイトの生成量を予測し、乾燥収縮の影響と拘束の影響を組み合わせて係数化することで、膨張コンクリートの体積変化と膨張ひずみを予測する考え方を示した。

また、提案した水和反応モデル及び各種予測結果を検証するために、水和発熱、膨張ひずみ、圧縮強度、空隙量、凍結融解抵抗性及び中性化抵抗性に関する実験を

行っており、予測結果と実験結果が比較的良く一致することを確認している。圧縮強度の予測において、予測精度を向上させるための補正係数を見出した。さらに、拘束条件での膨張コンクリートの膨張ひずみを予測するための拘束程度に関わる係数を設定することで推定精度が向上することを示した。本研究の結果として、膨張材の水和反応モデルから膨張コンクリートの水和率、力学的性質及び中性化深さを予測可能であり、効果的かつ有用であることを示した。

ABSTRACT

Although expansive additives have been widely used to efficiently reduce shrinkage cracking in concrete, little research has been undertaken to model the hydration reaction of cement and expansive additive blends and to predict the properties and durability of expansive concrete.

In this study, a numerical model to simulate the hydration reaction of cement paste containing expansive additive at an early age is proposed and then the compressive strength, carbonation depth and expansion strain of expansive concrete is predicted based on the hydration reaction model. Additionally, the influence of restrained condition on the mechanical properties and durability such as frost resistance and carbonation resistance are also investigated in this research. Using the proposed model, this study predicted the hydration degree, rate of heat evolution, gel/space ratio, amount of calcium silicate hydroxide (CSH), calcium hydroxide (CH), ettringite of hardening cement-expansive additive paste, and porosity of expansive concrete. For the experimental investigation, rate of heat evolution test, under-water weighing test, length change ratio test, expansion strain test, compressive strength test, mercury intrusion porosimetry test, freezing-thawing test and accelerated carbonation test were performed to verify the proposed model and predicting equation. From the relationship between the gel/space ration and compressive strength, an equation was deduced for prediction of the development of compressive strength of expansive concrete. Considering the diffusion of CO₂ in a gaseous phase into concrete pore and the reaction of CO₂ with CH and CSH, a mathematic model was proposed to predict the carbonation depth of expansive concrete. A hypothesis was described to predict the expansion strain through a model the volumetric change of expansive concrete calculated by combining the formation of ettringite, influence coefficient of shrinkage and restraint degree coefficient.

For verification of model and predicting equation, the results indicated good agreement of the calculated data with the measured data. Furthermore, this work also found that the model parameters (in hydration reaction model) can be represented as a function of the mineral composition of the cement. A coefficient was deduced to find the satisfactory value for predicted results (in predicting compressive strength). A restraint degree coefficient was found to build an equation for predicting the expansion strain of expansive concrete under restrained condition. The results demonstrate that the proposed model and equation are effective and useful in predicting the hydration, mechanical properties and carbonation depth of expansive concrete.

論文審査結果の要旨

コンクリート用膨張材は、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れを低減するために広く用いられているが、膨張材とセメントの水和反応に基づいて膨張コンクリートの力学的性質及び耐久性の予測方法は未だ確立されていない。そこで本研究では、膨張材を混和したコンクリートの初期材齢からの水和反応をモデル化するとともに、その水和反応モデルに基づいて膨張コンクリートの圧縮強度、中性化深さ及び膨張ひずみを予測する手法を確立することを目的としている。

本研究で提案した膨張材の水和反応モデルは、セメントの鉱物組成 (C3S, C2S, C3A, C4AF) をパラメータとし、膨張材とセメントの水和率、水和発熱量、ゲルスペース比、ケイ酸カルシウム水和物 (CSH)、水酸化ナトリウム (CH)、エトリンガイトの生成量及び空隙率を予測することが可能である。水和反応モデルから算出されたゲルスペース比から膨張コンクリートの圧縮強度の予測式、水和反応モデルから算出される CH 及び CSH の生成量と大気中の CO_2 のコンクリートへの拡散と CH 及び CSH と CO_2 との反応を考慮した膨張コンクリートの中性化深さの予測式を提案している。また、水和反応モデルからエトリンガイトの生成量を予測し、乾燥収縮の影響と拘束の影響を組み合わせることで膨張コンクリートの体積変化と膨張ひずみを予測する考え方も示している。

さらに、膨張コンクリートにおける圧縮強度、耐凍害性及び中性化抵抗性に及ぼす拘束条件の影響を実験的に把握し、提案した水和反応モデル及び圧縮強度、中性化深さ、膨張ひずみの予測結果の検証を行い、圧縮強度の予測精度を向上させるための補正係数と膨張ひずみを予測するための拘束補正係数を導入して推定精度の向上を実現している。

最後に、水和反応モデルを応用して異なる環境下での膨張コンクリートの力学的性質を予測するための深層学習の適用可能性について言及している。

以上の成果は、コンクリート構造物の耐久設計技術の向上に大いに資するものである。よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認められる。